HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	原始惑星系円盤の有機分子と硫黄系分子 ： モデルとALMA観測
Author(s)	野村, 英子; 樋口, あや; 坂井, 南美 他
Citation	低温科学, 78, 165-172
Issue Date	2020-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.78.165
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77778
Type	departmental bulletin paper
File Information	19_p165-172.LT78.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 78 （2020） 165–172
doi: 10.14943/lowtemsci. 78. 165

原始惑星系円盤の有機分子と硫黄系分子：モデルと ALMA 観測

野村　英子[1)]*，樋口　あや[1)]，坂井　南美[2)]，山本　智[3)]，長沢　真樹子[4)]，田中　今日子[5)]，三浦　均[6)]，中本　泰史[7)]，田中　秀和[5)]，山本　哲生[8)]，Catherine Walsh[9)]，Tom J. Millar[10)]

2019 年 11 月 1 日受付，2019 年 11 月 25 日受理

惑星は，原始惑星系円盤内のガスとダストから形成され，円盤内の化学進化を経て，我々の太陽系内物質が生成されたと考えられる．ALMA による惑星形成領域の高解像度・高感度観測は，円盤からの様々なガス輝線の検出を可能にした．一方で，塵表面反応も含めた円盤内の詳細な化学反応モデルも構築され，円盤から惑星系への化学進化が明らかになりつつある．本稿では，特に塵表面反応により生成されると考えられている複雑な有機分子と硫黄系分子に焦点を当て，円盤からのメタノールの初検出も含め，モデルと ALMA 観測に関する研究を紹介する．

Organic molecules and sulfur-bearing molecules in protoplanetary disks: modeling and ALMA observations

Hideko Nomura[1], Aya Higuchi[1], Nami Sakai[2], Satoshi Yamamoto[3], Makiko Nagasawa[4], Kyoko K. Tanaka[5], Hitoshi Miura[6], Taishi Nakamoto[7], Hidekazu Tanaka[5], Tetsuo Yamamoto[8], Catherine Walsh[9] and Tom J. Millar[10]

Planets are formed from gas and dust in protoplanetary disks, and it is thought that the materials in our Solar System were generated through chemical evolution taking place in a protoplanetary disk. The high-resolution and high-sensitivity observations of planet formation regions made with ALMA have enabled the detection of various gas emission lines from protoplanetary disks. In addition, detailed chemical reaction models of protoplanetary disks, including the dust surface reaction, have been established, and the chemical evolution from disks to planetary systems is currently being revealed. In this paper, we will focus on complex organic molecules (COMs) and sulfur-bearing molecules that are thought to be generated through grain surface reactions and introduce research on various models and ALMA observations, including the first detection of methanol in a protoplanetary disk.

*連絡先
野村　英子
国立天文台　科学研究部
〒181–8588　東京都三鷹市大沢 2–21–1
e-mail：hideko.nomura@nao.ac.jp
1）国立天文台
National Astronomical Observatory of Japan, Tokyo, Japan
2）理化学研究所
RIKEN, Wako, Japan
3）東京大学
The University of Tokyo, Tokyo, Japan
4）久留米大学
Kurume University, Kurume, Japan
5）東北大学
Tohoku University, Sendai, Japan
6）名古屋市立大学
Nagoya City University, Nagoya, Japan
7）東京工業大学
Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan
8）北海道大学
Hokkaido University, Sapporo, Japan
9）リーズ大学
University of Leeds, Leeds, UK
10）クィーンズ大学ベルファスト
Queen's University Belfast, Belfast, UK

キーワード：原始惑星系円盤，塵表面反応，化学反応ネットワーク，電波観測
protoplanetary disks, grain surface reactions, chemical reaction network, radio observations

1. はじめに

原始惑星系円盤は惑星形成の母胎であり，円盤内ダスト（固体微粒子・塵）から地球などの岩石惑星が，ガスから木星などのガス惑星が形成される．円盤内で惑星が形成される時間尺度に比べて化学反応の時間尺度は十分に短く，我々の太陽系内の物質は，円盤内ガス・ダストの化学進化を経て生成されたと考えられていれる．

近年の赤外線・電波天文観測技術の進展により，円盤からの様々な分子輝線の検出が可能になった．特に，南米チリに建設された大型ミリ波・サブミリ波干渉計 ALMA による高解像度・高感度観測により，円盤内のどのような領域にどのような分子が存在するのかが明らかになりつつある．

一方で，このような観測の進展を背景に，原始惑星系円盤の物理・化学構造モデルが急速に発展し，モデルと観測の比較より，惑星形成過程や太陽系内物質起源に関する議論が可能になりつつある．

本稿では，特に複雑な有機分子と硫黄系分子に焦点を当て，原始惑星系円盤物理・化学進化モデルと ALMA 観測に関する我々の研究とその背景，関連する最近の研究を紹介する．

2. 複雑な有機分子

2.1. 宇宙における有機分子生成

暖かな（～300 K＝27℃）地球上とは異なり，低温（～10 K）の宇宙空間では，活性化エネルギーが必要な反応や吸熱反応は，ほぼ進まない．よって，中性分子同士の気相反応は進みにくい．一方で宇宙空間には，分子を解離，あるいは電離する宇宙線や紫外線が存在する．分子が一度解離または電離すると，分子密度が小さい宇宙空間では再結合に時間がかかるため，ラジカルやイオンが豊富に存在することになる．ここでラジカルは，不対電子をもち，反応性の高い原子や分子を指す．ラジカルやイオンと中性分子の反応はほとんど活性化エネルギーを伴わないため，低温の宇宙空間では，これらの反応により，より複雑な分子が生成される．しかし，さらに複雑な分子を生成しようとすると，例えば，分子イオンが電子と再結合する際，解離してしまい，複雑な中性分子の生成率が低くなる．一方で，星形成領域などでは複雑な分子も観測されており，これらの観測を説明するためには，塵表面反応がおきていると考えられている．すなわち，低温下の気相中ではほとんど進まない化学反応が，塵の表面を触媒として，効率よく進むのである．

宇宙空間において複雑な有機分子は，星形成領域でよく観測されている．ここで，「複雑な分子」とは，便宜上，原子 6 個以上から構成される分子を指す．その生成過程として，以下のようなものが考えられている．まず，星が形成される直前の低温高密度領域において，気相の分子が塵表面に凍結し，塵表面反応により複雑な有機分子を生成する．その後，星が形成されると，星からの放射などで周囲の塵が暖められ，塵表面の分子が気相に蒸発する．その蒸発した分子の遷移線が観測されるのである．また星形成領域では，塵表面の氷中の分子も観測されており，塵表面反応の証拠と考えられている．また，太陽系の彗星中でも，同様の複雑な有機分子が観測されており，彗星中の氷の成分も塵表面反応により生成されたと考えられる（e.g., Herbst and van Dishoeck, 2009，図 1 参照）．

また一方で，宇宙空間で発見された分子の存在量を説明するため，星間化学反応ネットワークは年々進化している．これは，星間空間でおこりうる多数の化学反応を考慮して，様々な分子の存在量の時間進化を同時に計算するものである．ネットワークに含まれる反応として，例えば，複雑な有機分子生成に不可欠な塵表面反応では，従来はごく低温（＜20 K）での反応が考えられてきた．このような低温下においては，水素のような軽い元素しか効率よく塵表面を移動できず，比較的重い原子・分子に水素が付加して，H_2O や CH_4，NH_3，H_2S，CH_3OH といった，水素との化学結合を多く含み，不対電子をもたない分子，すなわち，水素で飽和した分子が生成される．実際，このような分子は，星形成領域の氷やガス，また，彗星中でよく観測されている（e. g., Tielens and Allamandola, 1987）．一方で，星形成領域や彗星中では，$HCOOCH_3$ など，水素付加反応だけでは説明できない分子も観測されている．このような分子の生成過程として，近年では，暖かな（30–50 K）塵表面での反応が提案されている．30–50 K 程度になると，水素分子は気相に蒸発してしまう一方で，比較的重い原子・分子が効率よく塵表面を移動できるようになる．ここで，水素で飽和した分子は安定で，反応にエネルギーが必要なものが多いが，これらが紫外線で解離して生成されるラジカルは反応性が高い．このようなラジカルが，塵表面を移動し

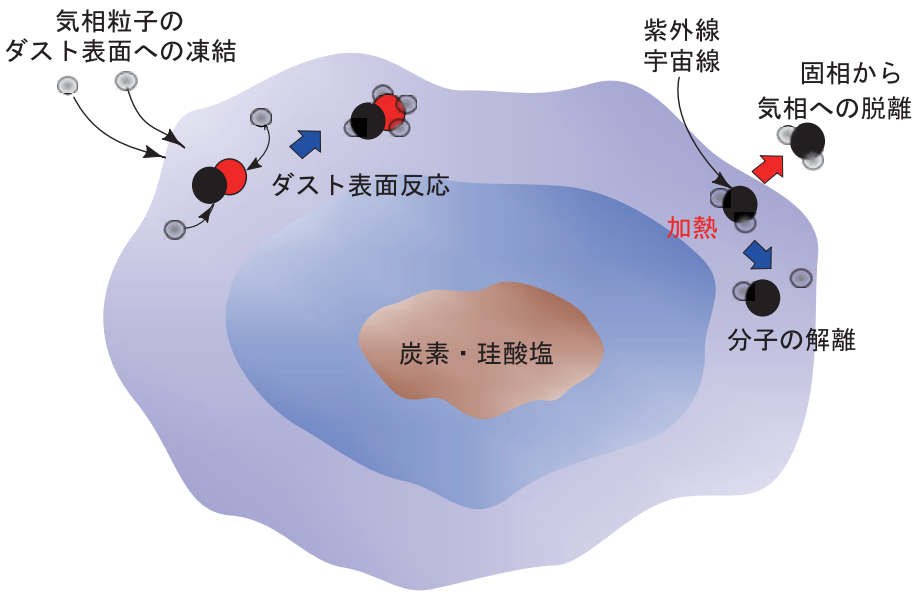

図 1：ダスト表面反応の模式図

て反応をおこすことで，$HCOOCH_3$ などの分子が生成されるのである（e.g., Garrod et al., 2008）．このような宇宙空間における塵表面反応は，地上の室内実験でも再現されており，例えばメタノールが水氷表面で水素付加反応により生成される過程が実験的に検証されている（e.g., Watanabe and Kouchi, 2008）．また，水素付加反応でできた分子を組成に持つ氷を 30–50 K 程度に暖め，紫外線を照射すると，新たな分子が生成されることが実験で確認されている（e.g., Öberg et al., 2009）．

2.2. 円盤における有機分子生成モデル

化学反応率は，ガス・ダストの温度・密度や紫外線，宇宙線，エックス線量などの物理量に強く依存する．従って，円盤内の化学進化を理解するためには，円盤の物理状態を理解する必要がある．ここで，円盤の主な熱源および紫外線，エックス線といった非熱的なエネルギー源は中心星である．密度分布もまた，中心星の重力の影響下で決まる．円盤ガス・ダストの主な熱源となる中心星からの照射光の輻射輸送や放射冷却などの温度を制御する素過程，また中心星の重力の影響を考慮した，詳細な円盤の密度・温度構造モデルが近年構築されてきた（e.g., Nomura et al., 2007）．

本研究（Walsh et al., 2014）では，上述の詳細な円盤物理構造モデル，および，約 800 種の原子・分子・イオンを含む気相反応，塵表面反応を合わせて約 9300 の化学反応を扱った化学反応ネットワークを用いて，円盤内の様々な分子，特に複雑な有機分子の存在量の分布を調べた．

ここで，円盤物理・化学構造の概要を述べておく（図 2 参照）．前述のように，円盤密度分布は中心星の重力の影響下にあり，赤道面付近に物質が集中している．また前述のように，円盤の主な熱源および紫外線，エックス線といった非熱的なエネルギー源は，中心星である．よって，熱源からの距離が遠く，かつ，中心星からの照射光が直接届かない円盤外縁赤道面付近は低温高密度であり，気相分子が塵表面に凍結している．一方で，円盤表層部では中心星からの紫外線やエックス線により，分子は電離・解離し，ラジカルやイオンが豊富に存在する．表層部と赤道面付近の中間の領域では，紫外線・エックス線照射は弱く，かつ暖かであるため，非ラジカル分子が豊富に気相に存在する（e.g., Aikawa et al., 2002）．

図 3 に，本研究（Walsh et al., 2014）の計算結果を示す．円盤外縁の赤道面付近で，気相分子が塵表面に凍結し，かつ塵表面反応をおこした結果，複雑な有機分子が豊富に存在している．メタノールは水素付加で生成される分子であり，円盤最外縁の低温領域にも存在する一方で，酢酸は水素付加では生成されないため，円盤最外縁では存在量が減少し，星に近く，より暖かな領域で存在量が増加する．いずれの分子も円盤最内縁（円盤半径約 2 天文単位以内）の高温領域では，塵表面から気相に熱的に脱離している．円盤外縁においては，中心星の紫外線が強い円盤表層部において，塵表面の分子が一部気相に光脱離している．赤道面付近では，宇宙線により塵表面から分子が脱離している．紫外線は円盤内の塵に吸収されるため，円盤表層部のみにしか影響を及ぼさないが，宇宙線は透過性が高く，赤道面付近においても影響を及

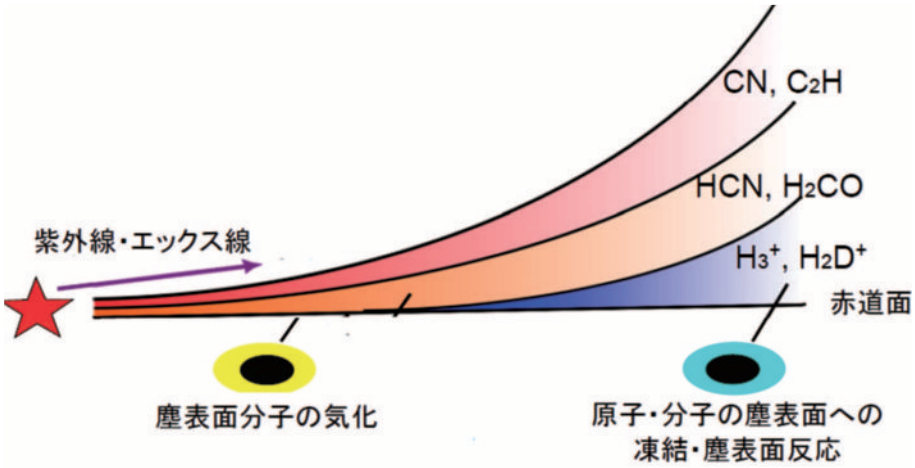

図 2：原始惑星系円盤の化学構造の模式図
中心星からの紫外線やエックス線にさらされた円盤表層部にはラジカルやイオン，中層部は安定な中性分子が存在し，低温高密度の円盤外縁の赤道面付近では気相分子は塵表面に凍結する．

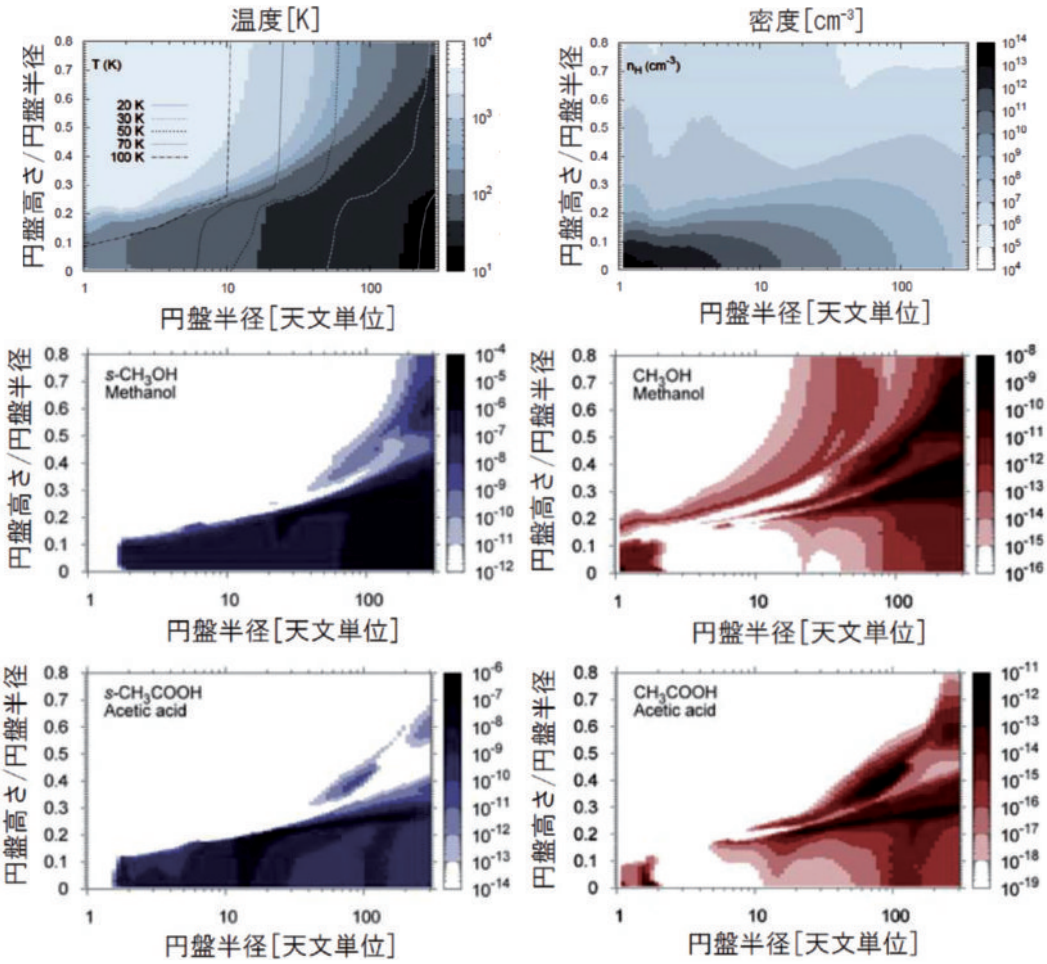

図 3：原始惑星系円盤の物理構造モデルと複雑な有機分子の分布
（左上）ガス温度分布　（右上）ガス密度分布
（左中）　メタノール（氷）の分布　（右中）メタノール（気相）の分布
（左下）　酢酸（氷）の分布　（右下）酢酸（気相）の分布
円盤赤道面付近で塵表面反応が効率よく進み，低温の円盤外縁部でも，塵表面分子の一部が紫外線などの非熱的な効果で気相に脱離している．（Walsh et al., 2014 を改変）

表 1：ALMA で観測したメタノールの遷移線

遷移	周波数（GHz）	励起状態のエネルギー（K）
2_{11}–2_{02}（A）	304.208	21.6
3_{12}–3_{03}（A）	305.473	28.6
4_{13}–4_{04}（A）	307.166	38.0
8_{17}–8_{08}（A）	318.319	98.8

ぼす．これらの物理・化学構造モデルをもとに円盤からの複雑な有機分子の輝線強度を輻射輸送計算して予測したところ，ALMA により，輝線が検出可能であることが予測された．

2.3. 円盤中の有機分子の ALMA 観測

上述のモデル計算に基づき観測提案を行い，ALMA で観測を行った．2015 年 1 月 2 日に，表 1 に記載した 4 本のメタノール遷移線の振動数帯を，太陽系の最近傍にある原始惑星系円盤である TW Hya 円盤（うみへび座 TW 星まわりの円盤）に対して 43 分間観測した．その結果，それぞれの輝線に対しては十分な感度の検出は得られなかったが，励起エネルギーの低い（20–40 K）3 本の輝線を積算して解析したところ，メタノール輝線が検出された．原始惑星系円盤からのメタノールの検出は，本観測が初である（Walsh et al., 2016）．

図 4 に，メタノール輝線スペクトルとチャネル・マップの観測とモデル計算との比較を示す．観測の空間分解能は，視直径にして 1.4×0.73 秒角（TW Hya までの距離を約 200 光年とすると，65 天文単位程度の空間分解能）であった．検出されたメタノールはぎりぎり空間分解されており，円盤半径 30 から 100 天文単位の間に分布していた．TW Hya 円盤の半径 30 天文単位より外側では，温度は約 20 K 以下であると考えられており，このような低温において，メタノールは塵表面から熱的には脱離できない．従って，観測されたメタノールは，モデル計算で示されたように，紫外線などの影響により，塵表面から気相に非熱的に脱離したと考えられる．

ところで TW Hya 円盤からは，ハーシェル宇宙天文台により，557 GHz および 1113 GHz 振動数帯の水の輝線が検出されている．この水も，円盤外縁の低温領域において，中心星からの紫外線などの影響により塵表面から脱離したと考えられている（Hogerheijde et al., 2011）．モデル計算と観測の比較により，ALMA で観測されたメタノールとハーシェルで観測された水の存在量をそれぞれ求めたところ，その比は CH_3OH/H_2O〜0.7–5% であった．この値は太陽系内の彗星中のメタノールと水の比と同程度であり，原始惑星系円盤内で塵表面に存在した氷が彗星に取り込まれた可能性を示唆する．ただし，観測値はあくまで気相中の分子の存在量であり，塵表面の存在量と必ずしも一致するわけではないので，注意が必要である．

一方で，2.1 節で述べた円盤内の複雑な有機分子の存在量分布のモデル計算の結果と，彗星から放出されたガス中の分子の存在量の天文観測の結果は，良い一致を示している．また最近では，彗星探査機ロゼッタにより，チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星から複雑な有機分子が検出された．これらの分子存在量と円盤モデル計算で得られた有機分子存在量を比較すると，NH_2CHO，$HOCH_2CHO$，CH_3COCH_3 などは，良い一致を示した．しかし，C_2H_5CHO，$C_2H_5NH_2$ などは観測値とモデル計算の結果は一致せず，さらに観測された有機分子の中には，現在用いられている化学反応ネットワークには入っていないような複雑な有機分子も含まれていた（Walsh, 2015）．今後，太陽系内で観測されている，さらに複雑な有機分子も説明できるようなモデルを構築することにより，原始惑星系円盤から太陽系内の有機物質への進化が明らかになっていくと期待される．

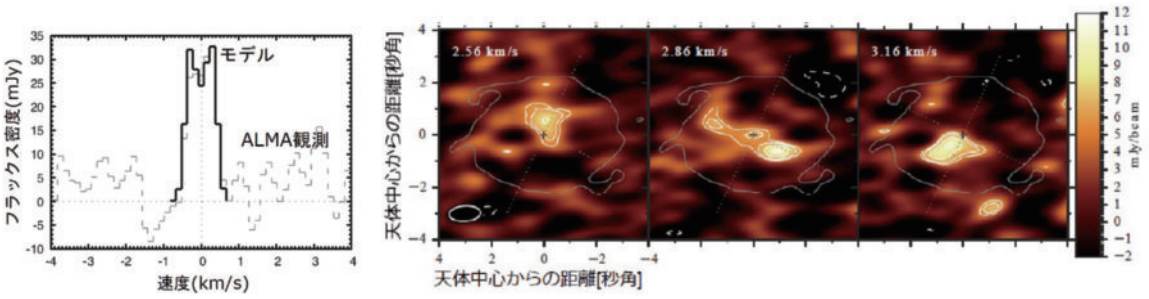

図 4：ALMA による原始惑星系円盤からのメタノールの初検出
円盤半径 30–100 天文単位の低温領域にメタノールが存在しており，非熱的な過程でダスト表面から脱離したと考えられる．（Walsh et al., 2016 を改変）

3. 硫黄系分子

3.1. 宇宙における硫黄系分子

宇宙空間で検出された硫黄系分子の数は，炭素，酸素，窒素系の分子の数に比べると圧倒的に少ない．主な原因の一つとしては，星間空間における気相中の水素に対する炭素，窒素，酸素の元素存在量は $(0.75\text{–}3.2)\times10^{-4}$ 程度であるのに対し，硫黄の元素存在量は 10^{-7} 程度と 3 桁程度小さいためである．氷中では酸素は主に H_2O，硫黄の多くは H_2S の状態にあり，その存在量比はせいぜい 0.1%である．一方で，硫黄の太陽組成は 10^{-5} 程度であり，分子雲中では多くの硫黄が固体の状態にあると考えられている．実際，分子雲中の気相の硫黄の元素存在量には，場所によってばらつきがあることが観測的に示唆されており，しばしば固体中に含まれる硫黄の量の違いで説明されている．太陽系内の彗星では硫黄の存在量は比較的高く，H_2O に対する H_2S の比は 1%程度であり，NH_3 の存在量と同程度である（e.g., Mumma and Charnley, 2011）．

星形成領域では，気相中の硫黄の元素存在量が局所的に高いことが観測的に示唆されている．これは，星からの放射などで加熱された結果，塵表面の硫黄系分子が気相中に熱的に脱離するためと考えられている．また，硫黄系分子は星間空間中で衝撃波が生じている領域でも，存在量が増加することが観測的に知られている．メタノールなどの複雑な有機分子も同様である．これは，磁場を伴う衝撃波中では，負に帯電した塵と中性粒子の間に速度差が生じるため，中性粒子が塵表面の氷を削り，氷中の分子が気相中に放出されるためと考えられている（e.g., Flower and Pineau des Forets, 1994）．硫黄系分子や複雑な有機分子の存在量は，低温の気相中では通常は低いため，これらの分子は衝撃波が存在する場合のみ存在量が高くなる，衝撃波トレーサーとしてよく扱われている．

3.2. 円盤内の氷微惑星蒸発トレーサーとしての硫黄系分子

原始惑星系円盤内で塵が集積することで，小惑星程度の大きさを持つ微惑星が形成され，さらに微惑星が合体成長して，原始惑星，そして惑星が形成されると考えられている．十分大きなサイズの原始惑星が円盤内で形成されると，周囲のガスが降着し，ガス惑星を形成する．一方で，ある程度大きな質量の天体が形成されると，天体の重力の影響で，周囲の微惑星の軌道離心率や傾斜角が大きくなる．その結果，微惑星と円盤ガスの間に衝撃波が生じる．その熱により，微惑星を構成する氷が円盤ガス中に蒸発すると考えられる（e.g., Tanaka et al., 2013; Nagasawa et al., 2014, 2019）．

ここで 3.1. 節で述べたように，硫黄系分子や複雑な有機分子は，衝撃波が生じた領域で存在量が高くなるため，円盤内で硫黄系分子や複雑な有機分子が高い存在量で観測されれば，氷微惑星蒸発の指標となりうる．ここで，複雑な有機分子は蒸発温度が高く（>100 K），中心星が太陽程度の質量の天体の場合，円盤半径 1–2 天文単位より外側の領域では，気相に蒸発してもすぐに塵に凍結してしまう．一方，衝撃波に伴い塵表面から蒸発した結果生成される硫黄系分子の一部は比較的蒸発温度が低く（~60 K），円盤半径 15–20 天文単位程度でも，気相に蒸発した後，塵に凍結せず，気相に存在し続けることができる．よって本研究（Nomura et al., in prep.）では，硫黄系分子を氷微惑星蒸発のトレーサーとして扱い，そのALMA による観測可能性を議論する．

氷微惑星中の硫黄系分子は，円盤ガス中に蒸発した後，周囲のガスと反応し，存在量が時間進化すると考えられる．そこでまず，氷微惑星の組成として太陽系内の彗星の組成を仮定し，衝撃波によって加熱され，気相に蒸発した後の化学反応を計算して，気相中の硫黄系分子の存在量の時間進化を調べた．図 5 に様々なダスト温度を仮定した場合の計算結果を示す．氷微惑星中の硫黄系分子は，主に H_2S および OCS を仮定している．H_2S は気相に蒸発すると $10^{4\text{–}5}$ 年程度の時間尺度で分解される．まず水素原子と反応し，硫黄原子を生成する．その後，酸素分子と反応して SO，さらに OH と反応して SO_2 を生成する（e.g., Nomura and Millar, 2004）．ここで，H_2S や SO の蒸発温度は 60 K 程度であるのに対し，SO_2 の蒸発温度は 130 K 程度と高い．従って，ダスト温度が 150 K の場合は，SO_2 は生成された後も気相にとどまるが，ダスト温度が 80 K まで下がると，SO_2 は生成されるとすぐにダストに凍結する．ダスト温度が 30 K まで下がると，H_2S や SO も気相にとどまることができず，10^2 年程度の時間尺度でダスト表面に凍結する．これらの計算により，H_2S や SO は巨大ガス惑星形成領域で気相中にとどまることができ，氷微惑星蒸発のトレーサーとして適していることが示された．

3.3. 円盤中の硫黄系分子の ALMA 観測

系外惑星の観測によると，短周期ガス惑星が存在する確率は＜5%程度，惑星質量が小さくなるほど存在確率は高くなり，スーパー地球（地球の 10 倍程度の質量をもつ惑星）程度では，50%近くまで上昇する．本研究

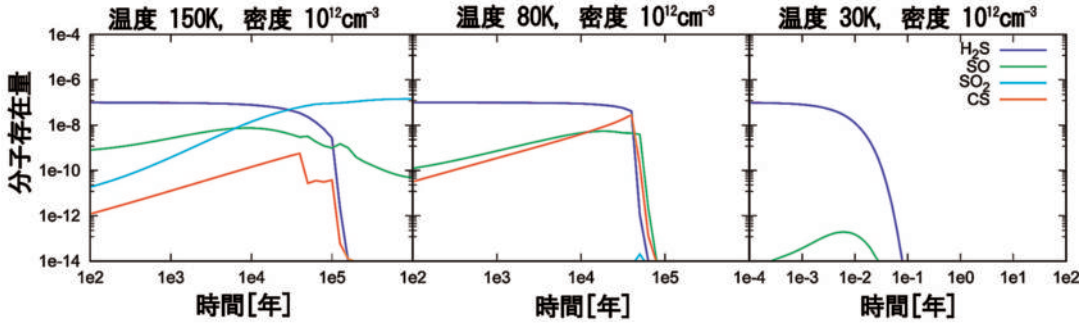

図 5：氷微惑星蒸発により気相に放出された分子の時間進化
氷微惑星から蒸発した分子は，$10^{4\text{-}5}$ 年の時間尺度で化学反応をおこし，分子存在量が時間進化する．各々の分子の蒸発温度に比べてダスト温度が低くなると，分子は塵表面に凍結する．

（Nomura et al., in prep.）では，数天体程度で硫黄系分子が検出されることを期待して，おうし座分子雲中の原始惑星系円盤 10 天体に対して，表 2 に記載した H_2S，SO，SO_2，^{13}CS の遷移線を含む振動数帯で観測を行った．観測は 2016 年 8 月 1，17，27 日に遂行されたが，観測時間が十分ではなく，硫黄系分子は検出されなかった．しかし，それぞれの輝線に対し，厳しい上限値は得られた．

観測がおこなわれた時点では，原始惑星系円盤からの CS 以外の硫黄系分子の検出例はなかったが，より若く，周囲にエンベロープをまとった原始星天体では，エンベロープから円盤への降着流が，円盤との境界領域で衝撃波をおこしていると考えられる場所で，SO 輝線が ALMA により観測されている（e.g., Sakai et al., 2014; Miura et al., 2017）．また最近では，周連星系円盤で H_2S が，原始惑星系円盤からのアウトフローと考えられる領域で SO がそれぞれ観測されており，さらに，原始惑星系円盤から H_2CS の検出も報告されている（e.g., Oya et al., 2016, Le Gal et al., 2019）．

本研究の観測で得られた H_2S，SO 輝線の上限値とモデル計算の比較により，円盤内の気相中の H_2S，SO の存在量に上限値を与えた．具体的には，円盤の傾斜角（30°－70°）と硫黄系分子が存在する外縁半径（60–100 天文単位），硫黄系分子の存在量をパラメータとして振り，円盤物理構造モデルをもとに分子輝線強度の輻射輸送計算を行い，観測の上限値と比較した．その結果，水素に対する存在量として，H_2S では $<10^{-11}$，SO では $<10^{-10}$ の上限値が得られた．気相中の H_2S や SO が，塵表面の氷の非熱的脱離により生成されたものであり，太陽系の彗星が，円盤中の氷をまとった塵から形成されたと考えると，2.3 節で述べたメタノールの場合と同様，H_2S や SO の存在量は，彗星中の氷の組成と似たものとなることが予想される．実際，今回観測された H_2S や SO の存在量の上限値と，ハーシェル宇宙天文台による観測で得られた円盤外縁における水の存在量（$\sim 10^{-9}$）との比をとると，その値は，太陽系内の彗星中の存在量比（$H_2S/H_2O \sim 10^{-2}$，$SO/H_2O \sim 10^{-3}$）と矛盾しない値であった．今後，さらに感度の高い観測を行うことにより，円盤内外縁の硫黄系分子の存在量，ひいては，円盤内縁の氷微惑星蒸発現象に対して，より厳しい制限が与えられると期待される．

表 2：ALMA で観測した硫黄系分子の遷移線

分子	遷移	周波数（GHz）
H_2S	$2_{2,0}$–$1_{1,1}$	216.710
SO	6_5–5_4	219.949
^{13}CS	5–4	231.221
SO_2	$16_{6,10}$–$17_{5,13}$	234.422

4. 今後の展望

近年様々な複雑な有機分子が星形成領域などで発見されており，それらを説明するため，塵表面反応も含めた星間化学反応ネットワーク計算が発達してきた．一方で，近年の赤外線・電波天文観測の進展を背景に，惑星形成の母胎である原始惑星系円盤の物理・化学構造モデルの進展が目ざましい．また，塵表面反応を介して生成されると考えられる複雑な有機分子や硫黄系分子も原始惑星系円盤から特に ALMA を用いた天文観測により検出されつつある．さらに探査機を用いて，太陽系内小天体中の物質組成に関する詳細な情報も得られつつある．今後，これらの観測の情報を取り入れた詳細な物理・化学進化モデルを構築することにより，原始惑星系円盤から太陽系，ひいては系外惑星系への物質進化が明らかになっていくと期待される．

謝辞

筆者は，文科省科学研究費 新学術領域研究（25108004，18H05441），JSPS 基盤研究（C）（19K03910）および ALMA 共同科学研究事業 2018-10B からの補助を受けています．

参考文献

Aikawa, Y., G. J. van Zadelhoff, E. F. van Dishoeck and E. Herbst (2002) Warm molecular layers in protoplanetary disks. *Astron. Astrophys.*, **386**, 622–632.

Flower, E. R. and G. Pineau des Forets (1994) Grain / Mantle Erosion in Magnetohydrodynamic Shocks. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **268**, 724–732.

Garrod, R. T., S. L. Widicus Weaver and E. Herbst (2008) Complex Chemistry in Star-forming Regions: An Expanded Gas-Grain Warm-up Chemical Model. *Astrophys. J.*, **682**, 283–302.

Herbst, E. and E. F. van Dishoeck (2009) Complex Organic Interstellar Molecules. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **47**, 427–480.

Hogerheijde, M. R., E. A. Bergin, C. Brinch, L. I. Cleeves, J. K. J. Fogel, G. A. Blake, C. Dominik, D. C. Lis, G. Melnick, D. Neufeld, O. Panić, J. C. Pearson, L. Kristensen, U. A. Yıldız, E. F. van Dishoeck (2011) Detection of the Water Reservoir in a Forming Planetary System. *Science*, **334**, 338–340.

Le Gal, R., K. I. Oberg, R. A. Loomis, J. Pegues, J. B. Bergner (2019) Sulfur Chemistry in Protoplanetary Disks: CS and H_2CS. *Astrophys. J.*, **876**, 72.

Miura, H., T. Yamamoto, H. Nomura, T. Nakamoto, K. K. Tanaka, H. Tanaka and M. Nagasawa (2017) Comprehensive Study of Thermal Desorption of Grain-surface Species by Accretion Shocks around Protostars. *Astrophys. J.*, **839**, 47.

Mumma, M. J. and S. B. Charnley (2011) The Chemical Composition of Comets-Emerging Taxonomies and Natal Heritage. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **49**, 471–524.

Nagasawa, M., K. K. Tanaka, H. Tanaka, T. Nakamoto, H. Miura and T. Yamamoto (2014) Revisiting Jovian-resonance Induced Chondrule Formation. *Astrophys. J. Lett.*, **794**, L7.

Nagasawa, M., K. K. Tanaka, H. Tanaka, H. Nomura, T. Nakamoto and H. Miura (2019) Shock-generating Planetesimals Perturbed by a Giant Planet in a Gas Disk. *Astrophys. J.*, **871**, 110.

Nomura, H. and T. J. Millar (2004) The physical and chemical structure of hot molecular cores. *Astron. Astrophys.*, **414**, 409–423.

Nomura, H., Y. Aikawa, M. Tsujimoto, Y. Nakagawa and T. J. Millar (2007) Molecular Hydrogen Emission from Protoplanetary Disks. II. Effects of X-Ray Irradiation and Dust Evolution. *Astrophys. J.*, **661**, 334–353.

Öberg, K. I., R. T. Garrod, E. F. van Dishoeck and H. Linnartz (2009) Formation rates of complex organics in UV irradiated CH_3OH-rich ices. I. Experiments. *Astron. Astrophys.*, **504**, 891–913.

Oya, Y., N. Sakai, A. López-Sepulcre, Y. Watanabe, C. Ceccarelli, B. Lefloch, C. Favre, S. Yamamoto (2016) Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293–2422 Source A Studied with ALMA. *Astrophys. J.*, **824**, 88.

Sakai, N., Y. Oya, A. Higuchi, Y. Aikawa, T. Hanawa, C. Ceccarelli, B. Lefloch, A. López-Sepulcre, Y. Watanabe, T. Sakai, T. Hirota, E. Caux, C. Vastel, C. Kahane, S. Yamamoto (2017) Vertical structure of the transition zone from infalling rotating envelope to disc in the Class 0 protostar, IRAS 04368+2557. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **467**, L76-L80.

Sakai, N., T. Sakai, T. Hirota, Y. Watanabe, C. Ceccarelli, C. Kahane, S. Bottinelli, E. Caux, K. Demyk, C. Vastel, A. Coutens, V. Taquet, N. Ohashi, S. Takakuwa, H.-W. Yen, Y. Aikawa, S. Yamamoto, (2014) Change in the chemical composition of infalling gas forming a disk around a protostar. *Nature*, **507**, 78–80.

Tanaka, K. K., T. Yamamoto, H. Tanaka, H. Miura, M. Nagasawa, T. Nakamoto (2013) Evaporation of Icy Planetesimals Due to Bow Shocks. *Astrophys. J.*, **764**, 120.

Tielens, A. G. G. M. and L. J. Allamandola (1987) Composition, Structure, and Chemistry of Interstellar Dust. in Interstellar Processes, ed. D. J. Hollenbach & H. A. Thronson, Jr. (Dordrecht: Springer), pp. 397–470.

Walsh, C. (2015) Chemical complexity in protoplanetary disks in the era of ALMA and Rosetta. *Euro. Astronom. Soc.*, **75**, 315–320.

Walsh, C., R. A. Loomis, K. I. Öberg, M. Kama, M. L. R. van 't Hoff, T. J. Millar, Y. Aikawa, E. Herbst, S. L. Widicus Weaver, H. Nomura (2016) First Detection of Gas-phase Methanol in a Protoplanetary Disk. *Astrophys. J. Lett.*, **823**, L10.

Walsh, C., T. J. Millar, H. Nomura, E. Herbst, S. Widicus Weaver, Y. Aikawa, J. C. Laas, A. I. Vasyunin (2014) Complex organic molecules in protoplanetary disks. *Astron. Astrophys.*, **563**, A33.

Watanabe, N. and A. Kouchi (2008) Ice surface reactions: A key to chemical evolution in space. *Prog. Surf. Sci.*, **83**, 439–489.